干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

基于遥感的宁夏地区高温热浪风险评估

赵志欣[1,2]， 霍艾迪[1,2]， 张 丹[3]， 易 秀[1,2]， 陈思名[1,2]，
陈四宾[1,2]， 陈 建[1,2]

（1. 长安大学水利与环境学院，陕西 西安 710054；2. 长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室，陕西 西安 710054；3. 中国科学院地理科学与资源研究所，北京 100101）

摘 要：高温热浪灾害风险信息对全球气候变暖及快速城市化条件下的防控极端灾害事件具有重要的参考价值。为了解决高温热浪危险性因子评估不全面的问题，基于多源卫星遥感数据和社会经济统计数据，在结合地表温度和气象数据作为高温危险性因子的基础上，通过层次分析法和图层叠置法评估模型计算得到2014—2019年7—8月宁夏高温热浪风险等级空间分布图。结果表明：宁夏高温热浪风险总体上处于中等偏上水平，较高和高风险地区面积占比从2014年39.52%增长至2019年62.65%；受地理纬度、地形和气候的影响，高温风险分布出现明显的空间差异，北部风险总体高于南部风险（高出约13.27%），西部风险高于东部（高出约12.30%）；高风险地区集中在中卫市和石嘴山市，这主要是城市高温和相对较低的医疗水平共同作用的结果。研究结果有助于服务城市高温灾害的预防以及制定应对高温热浪应急方案。

关 键 词：高温热浪；人居指数；风险评估；遥感；宁夏
文章编号：

IPCC第五次评估报告用海量的事实证明全球气候变暖是无可争辩的[1]。世界卫生组织指出，如果变暖情况得不到减缓，预计到2030年，全世界因气候变暖而死亡的人数将从10×10^4人·a^{-1}增至30×10^4人·a^{-1}[2]。气候变暖与城市化的叠加效应进一步加剧了高温热浪事件的范围和强度[3]。高温热浪天气不仅直接造成人类死亡，还会导致呼吸系统、心脑血管等疾病的发病人数激增[4-5]，严重影响了居民的健康及正常生活。同时，高温热浪对工农业生产、旅游、交通的生态服务功能等带来重大影响[6-7]。因此，高温热浪越来越受到政府和学术界的共同关注。

国内外学者在高温热浪产生机理[8]、特点[9]、影响[10]、风险评估[11]、流行病学[12]以及高温灾害预测[13]等方面已取得了不错的成果。如Phung等[14]通过研究2010—2013年期间湄公河三角洲地区132个地区热相关的发病率发现，平均气温每升高5 ℃，区域内的住院人数就会增加6.1%。Kuglitsch等[15]选取高温热浪强度、长度和频次指标，分析了地中海东部高温热浪趋势。Inostroza等[16]通过建立高温热浪风险评估模型，对圣地亚哥的高温风险进行了分析和预测。Gertrud等[17]评估了4种热浪影响包括日发病率、电力需求和消费以及供水对高温的相互影响。张晓艳等[18]分析了洞庭湖流域内1960—2013年高温热浪风险的时空变化规律及其特征。

近年来，在全球气候变暖的大背景下，宁夏高温天气出现的次数和强度都有所增加[19]。杨建玲等[20]结合相关气象数据对宁夏地区高温日数空间分布进行评估；孙艺杰等[21]通过计算黄土塬区近57 a热浪指数，分析了热浪的时空变化特征；刘学智等[22]利用1962—2015年相关气象数据资料对宁

收稿日期：2021-06-18； **修订日期**：2021-09-26
基金项目：国家自然科学基金重大项目（41790444/D0214）；国家自然科学基金面上项目（41877232）；中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA20030302）；宁夏自然科学基金项目（2020AAC03476）资助
作者简介：赵志欣（1996-），女，硕士研究生，主要从事生态环境变化与灾害等方面的研究. E-mail: zhao1201xin@163.com
通讯作者：霍艾迪（1971-），男，博士，教授，主要从事遥感在水文生态等方面的研究. E-mail: huoaidi@163.com

夏地区气温变化周期进行了分析；杨宝玲等[23]对西北地区大气环流异常方面进行了研究。以上研究均能清晰地反应地区的高温风险状况，为预防高温减灾行动提出了有效的方案，但是这些研究多偏重于通过气象数据来分析高温热浪的强度与频次，对社会经济统计数据关注较少，且由于所用气象数据位置与数量的限制，精细化程度还有待进一步提高。鉴于此，本文基于多源遥感数据和社会经济统计数据，在提取了宁夏高温危险性因子、社会经济脆弱性因子和高温热浪风险适应性因子的基础上，利用层次分析法（Analytic hierarchy process，AHP），对宁夏2014—2019年7—8月进行公里级尺度高温热浪风险评估，建立高温热浪风险评估模型，探究研究区高温热浪的空间分布特征，以期为城市高温灾害的预防以及应对高温热浪提供科学支撑。

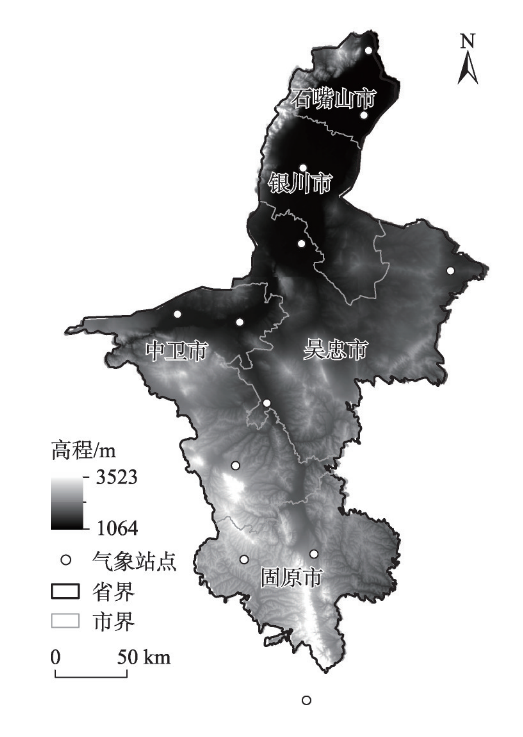
1 研究区及数据

1.1 研究区概况

宁夏地处我国西北部的黄河中上游地区，东邻陕西，西、北接内蒙古，南连甘肃（图1），地理位置介于35°14′~39°23′N、104°17′~107°39′E之间，总面积为6.64×10^4 km²。宁夏属温带大陆性干旱、半干旱气候，四季分明，最热月为7月，年均气温在16.9~24.7 ℃之间，年均降水量166.9~647.3 mm[24-25]，北少南多，差异明显。随着城市水平不断提高，城市用地不断扩张、人口持续增长，城市热岛效应加重[26]，城市和人群面临的高温风险持续增加[27]。

1.2 数据来源及预处理

选用的数据有地表温度（Land surface temperature，LST）、气温、气压、风速、降水量、归一化植被指数（Normalized difference vegetation index，NDVI）、DMSP/OLS夜间灯光以及宁夏各区县的常住人口、



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2017)1267号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1 研究区概况

Fig. 1 Location and elevation of the study area

14岁以下65岁及以上人口占比、人均GDP、建筑施工人员、城镇居民每百户空调拥有率、卫生机构床位数、医疗卫生技术人员等社会统计数据，具体来源见表1。

为了方便栅格计算，需要对所选的数据进行投影、重采样至1 km后归一化处理。同时，为了减少噪声干扰，最大限度保证数据的质量，需要通过公式（1）获得多时相MODIS NDVI的年内合成最大值[28]，其可以较好地反应当年植被长势最好季节的植被覆盖情况[29]。

$$NDVI_{max} = Max(NDVI_1, NDVI_2, \cdots, NDVI_{23}) \quad (1)$$

式中：$NDVI_{max}$为一年MODIS 16 d最大值合成；

表1 数据详细说明

Tab. 1 Detailed description of the data

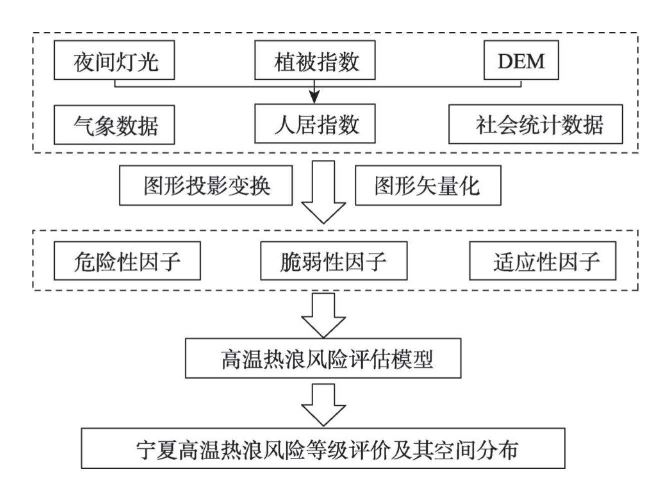
数据名称	观测平台	时间分辨率/次·d⁻¹	空间分辨率/km	数据来源
LST	Aqua	2	1.00	https://modis.gsfc.nasa.gov/
NDVI	Aqua	2	0.25	https://modis.gsfc.nasa.gov/
DMSP/OLS夜间灯光	DMSP	1	1.00	http://ngdc.noaa.gov/eog/
DEM	Terra	2	0.08	http://www.gscloud.cn/search
气象数据	–	–	–	http://data.cma.cn
社会统计数据	–	–	–	2014、2017年和2019年宁夏统计年鉴

注：LST为地表温度；NDVI为归一化植被指数；DEM为数字高程模型。下同。

$NDVI_1$, $NDVI_2$, …, $NDVI_{23}$ 为一年中每16 d 1次的合成产品。

2 研究方法

参考美国国家环保局(U.S Environmental Protection Agency, EPA)生态风险评估导则[30]以及IPCC第五次评估报告[1],结合前人研究,综合考虑高温热浪风险组成要素及特征,构建基于"高温危险性-社会经济脆弱性-高温热浪风险适应性"的宁夏高温热浪风险评估框架(图2)。



注:DEM为高程。

图2 高温热浪风险评估框架

Fig. 2 Frame of heat wave risk assessment

2.1 高温危险性因子

高温危险性是指外部因素对系统内部产生了威胁,其发生的重要指标是气温和降水量[31]。考虑到数据的获取性,本文将气温、降水量、风速与气压作为宁夏高温危险性评价的遥感指标。获取气温的方法主要是通过当地气象站,但气象站数目偏少、位置有限,导致大尺度的空间分析精度不高。作为监测资源环境动态变化的重要因素,遥感反演的地表温度与气温之间存在显著的线性关系已被多项研究证实[32],因而可以将其共同作为宁夏高温危险性评价的指标。

2.2 社会经济脆弱性因子

脆弱性因子指城市内部承灾体承受风险的能力,选择人居指数作为主要的脆弱性评估指标。辅以建筑施工人员、14岁以下和65岁以上人口占比以及常住人口作为次要脆弱性评估指标。

2.2.1 人居指数因子 为了提高人口状况空间分布的精度,本文参考Lu等[33]的研究,融合了DMSP/OLS夜间灯光、NDVI和DEM,利用以下公式构建人居指数(Human settlement index, HSI):

$$HSI = \frac{(1 - NDVI_{maxi}) + DMSP_{nori}}{(1 - DMSP_{nori}) + NDVI_{maxi} + DMSP_{nori} \times NDVI_{maxi}} \times e^{-0.003DEM} \tag{2}$$

式中:$NDVI_{maxi}$ 为 i 年MODIS 16 d最大值合成;$DMSP_{nori}$ 为标准化后的 i 年夜间灯光指数(0~1);DEM为高程数据。

2.2.2 其他脆弱性因子 灾害发生时该地区的受灾程度与经济水平和不同特征的人群有关。相关研究表明,当地人均生产总值越大,该地区经济脆弱性就越高[31]。敏感人群例如婴幼儿、老人以及暴露在烈日下的工作者相比其他人群更易受到高温的侵害[34]。由于建筑施工人员、14岁以下和65岁以上人口占比以及常住人口数据缺乏合理有效的空间化方法,假设各个市区内数值相同,再基于ArcGIS对矢量数据进行栅格化处理。

2.3 高温热浪风险适应性因子

适应性因子是指人群为适应或应对高温灾害而做出的反应,主要体现在外部资源分配的多少。生活环境良好和医疗卫生先进的城市在应对高温热浪时,受到的社会经济威胁相对减弱[35]。选取人均GDP、每百户居民空调拥有率、城镇卫生机构床位数和医疗卫生技术人员作为适应性评价指标。由于以上数据缺乏合理有效的空间化方法,采用与脆弱性数据相同的处理方法获得栅格数据。

2.4 高温热浪风险评估模型

2.4.1 层次分析法 首先根据高温热浪风险的组成要素划分出相应的目标层(A)、准则层(B)和指标层(C);其次对指标进行两两比较,根据其相对重要程度构造判断矩阵,通过一致性检验后,可得出各指标所占权重(表2),以上算法均通过Matlab实现。同时,为了使各项数据具有可加性,需要对指标层中各数据进行归一化处理,值域范围统一到[0, 1]。

2.4.2 图层叠置法 利用ArcGIS 10.3空间叠加工具,计算准则层指标,公式如下

$$B_i = \alpha_i C_i \tag{3}$$

式中:B_i 为准则层指标;C_i 为指标层各因子;α_i 为各指标层因子所占的权重。计算出准则层指标后,

表2 高温热浪风险评估指标体系及权重

Tab. 2 Evaluation indexes and weight values of heat waves risk

目标层(*A*)	准则层(*B*)	指标层(*C*)
高温热浪风险*A*	高温热浪危险性B_1(+0.46)	地表温度C_1(+0.4)
		气温C_2(+0.4)
		降水量C_3(−0.1)
		风速C_4(−0.05)
		气压C_5(−0.05)
	社会经济脆弱性B_2(+0.31)	人居指数C_6(+0.6)
		常住人口C_7(+0.24)
		14岁以下65岁以上人口占比C_8(+0.1)
		建筑施工人员C_9(+0.06)
	高温热浪风险适应性B_3(−0.23)	人均GDP C_{10}(−0.6)
		城镇每百户空调拥有率C_{11}(−0.18)
		城镇卫生机构床位数C_{12}(−0.11)
		城镇医疗卫生技术人员C_{13}(−0.11)

利用ArcGIS 10.3空间叠加工具，通过公式(4)计算得到宁夏高温热浪风险指数*A*：

$$A = 0.46B_1 + 0.31B_2 - 0.23B_3 \tag{4}$$

式中：B_1为高温热浪危险性指标；B_2为社会经济脆弱性指标；B_3为高温热浪风险适应性指标。

3 结果与分析

3.1 高温热浪危险性评估

基于表2可知高温热浪危险性所选取的指标C_1、C_2、C_3、C_4、C_5，将所选指标栅格化后加载到ArcGIS 10.3中，利用ArcGIS 10.3空间叠加工具，加权计算准则层指标B_1，得到2014、2017年和2019年7—8月的高温危险性空间分布图(图3)，其中高温热浪危险性高和较高的区域主要分布在石嘴山市，银川市、吴忠市的西部以及中卫市的北部，这些地区人口压力大、城镇建筑物密集、裸地以及耕地面积大；而危险性低与较低的区域主要分布在固原市。原因主要有：固原市的海拔较高，温度随着海拔的增高而减低，且建筑总地比重小，热岛效应相对较小。

3.2 社会经济脆弱性评估

基于表2可知社会经济脆弱性所选取的指标C_6、C_7、C_8、C_9，将所选指标栅格化后加载到ArcGIS 10.3中，利用ArcGIS 10.3空间叠加工具，加权计算准则层指标B_2，得到2014、2017年和2019年7—8月的脆弱性空间分布(图4)，其中脆弱性等级高和较高的区域主要分布在吴忠市西部、中卫市以及固原市西北部，主要原因是这些区域人口相对周边较为聚集。2014年和2017年银川市和石嘴山市有部分区域脆弱性处于较高风险，主要原因是有更多的建筑施工以及外业人员加快城市化发展。银川市南部以及石嘴山四周风险等级较低，主要为农用地以及一部分裸地，人口密度小，脆弱性相对较低。

3.3 高温热浪风险适应性评估

基于表2可知高温热浪风险适应性所选取的指标C_{10}、C_{11}、C_{12}、C_{13}，将所选指标栅格化后加载到ArcGIS 10.3中，利用ArcGIS 10.3空间叠加工具，加权计算准则层指标B_3，得到2014、2017年和2019年7—8月的高温热浪风险适应性空间分布图(图5)，其中风险适应性高的区域主要分布在银川市中部，更好

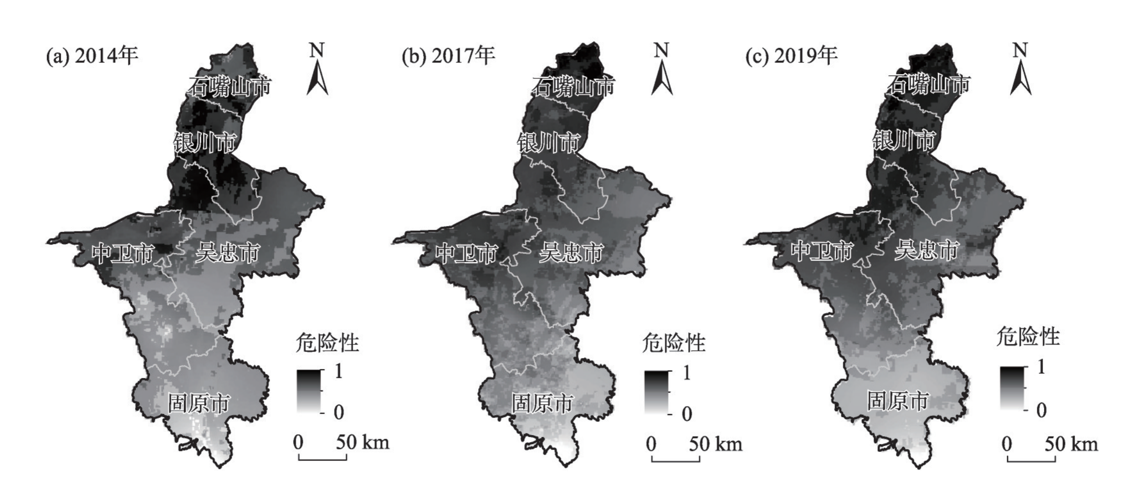


图3 高温热浪危险性空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of hazard factors of heat wave

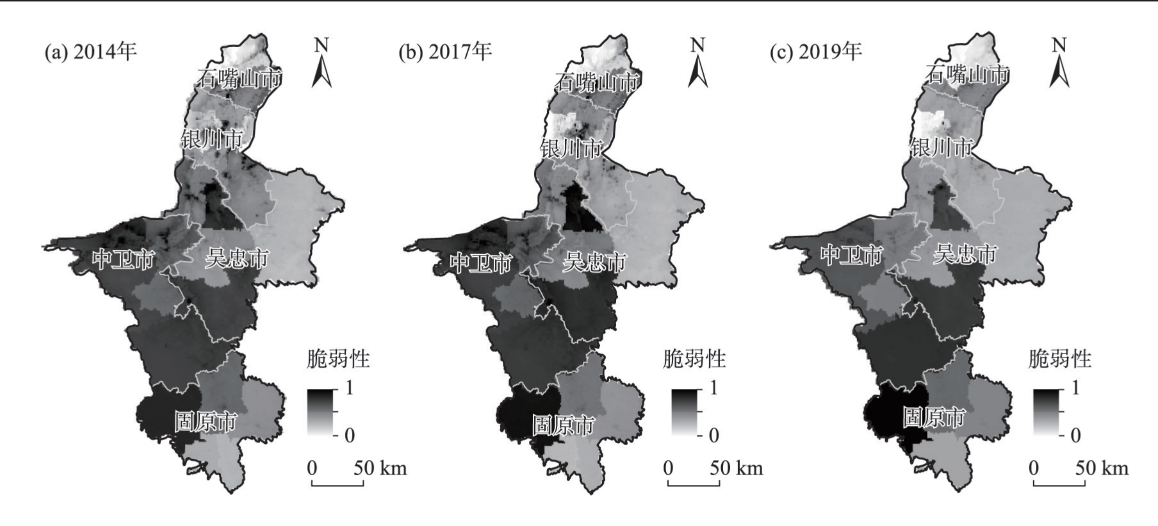


图4 社会经济脆弱性空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of vulnerability factors of heat wave

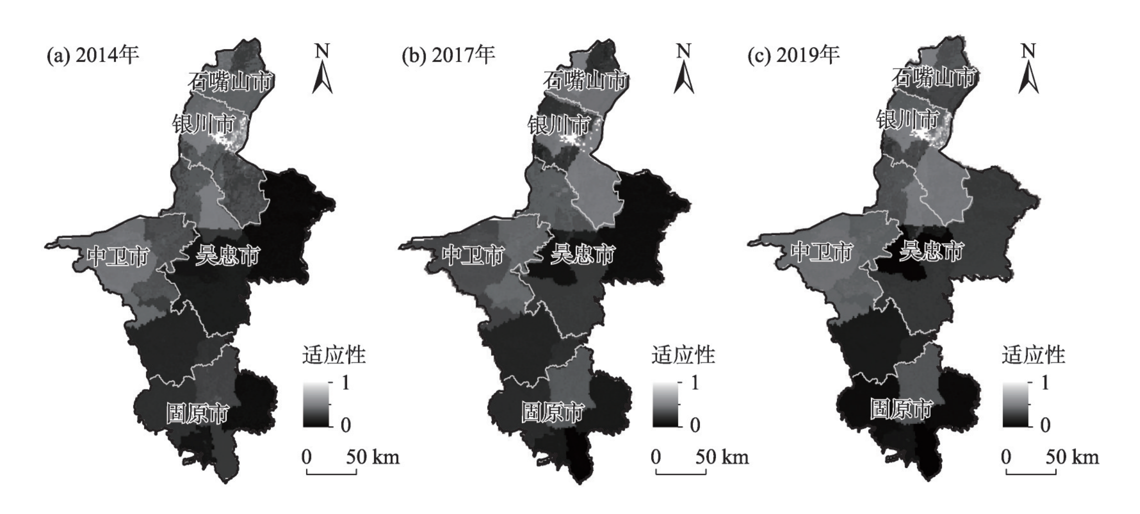


图5 高温热浪风险适应性空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of adaptation factors of heat wave

的医疗水平和空调覆盖率使该区域的适应性指数更高。由于社会经济发展水平不断提高，宁夏地区平均风险适应性在2014—2019年中增加了64%。

3.4 风险性评估及空间分析

根据图2的高温热浪评估体系，基于层次分析法将各因子进行空间叠置得到宁夏高温热浪风险指数，并采用自然断点法将风险等级划分为5级(图6)，其风险等级阈值为0.037~0.273、0.273~0.350、0.350~0.405、0.405~0.465、0.465~0.737，分别为低风险区、较低风险区、中风险区、较高风险区以及高风险区。由图6可知，宁夏地区高温热浪风险性整体表现出由东北向西南递增的空间分布特征，其中较高和高风险地区面积占比从2014年39.52%增长至2019年62.65%。高风险地区主要集中在宁夏中部以及北部市县，大多位于海拔相对较低的地区。这部分地区人口密度大，建筑总地比重高，城市热岛效应强烈，故风险性高。较高风险地区大都存在于高风险地区周围，这些地区植被覆盖率较低，土壤多以灰钙土为主[36]，热容量较小，因长日照、强辐射导致温度快速升高，从而使高温危险性增加。同时，这些地区人均生产总值相对落后，高温脆弱性较高，因此面临着较高的高温风险。风险最低的区域主要集中在宁夏南部以及中北部市县，南部地区受地理纬度和地形的影响，年降水量相对较多，湿度较大，植被覆盖度高，因此高温危险性和脆弱性较小；中北部市县因其经济发展水平较高，居住环境和医疗水平较高，从而对高温的适应性较高，因此高温热浪风险较小。

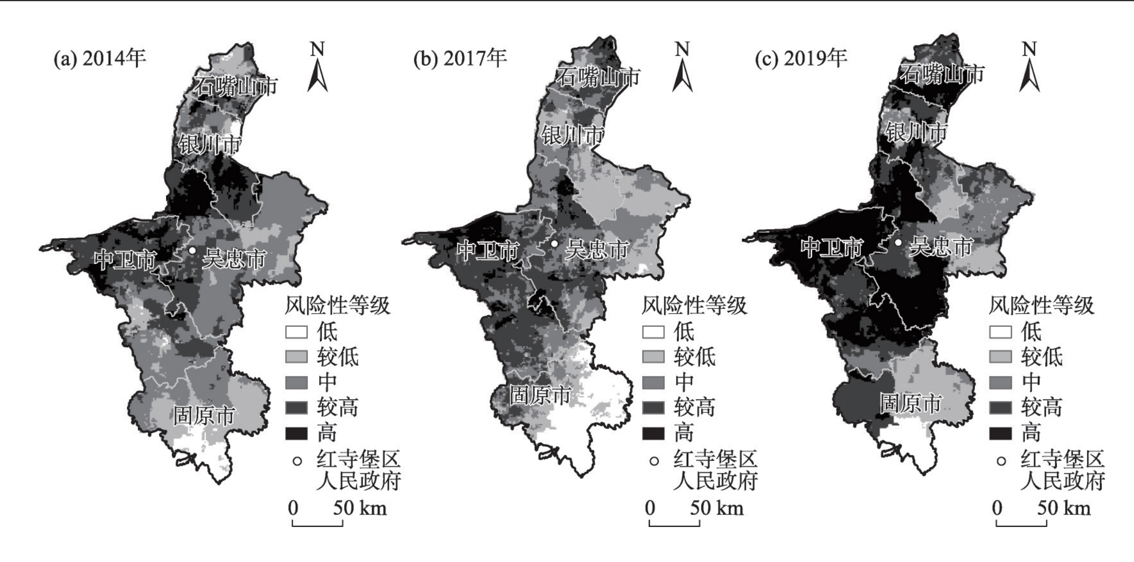


图6 风险性空间分布

Fig. 6 Spatial distributions of the heat wave risk of Ningxia

以红寺堡区人民政府为中心，统计南北、东西方向沿线的风险等级(图7)。宁夏中部的风险远高于其他地区，北部风险总体高于南部，北部最高风险比南部最高风险多年平均高13.27%，该现象主要从南向北因纬度的增加，年降水量递减，而蒸发量递增，南部海拔高，植被覆盖度较高，所以高温危险性比较低；西部最高风险比东部最高风险高12.30%，东西部均处于中部干旱带，多旱少雨，土壤以灰钙土和风沙土为主，植被覆盖度不高[37]，又因西部人口比东部密集，故而西部总体风险略高于东部。西部剖面线波动范围较小，表明西部风险强度的空间差异较小。

宁夏地区各市县高温热浪风险空间分布差异较为显著。宁夏各市高温风险等级所占的面积比例如图8所示。由图8a可以看出，银川市的高温风险性最高，高风险面积与较高风险面积占比达62.04%，其次是中卫市和吴忠市，高风险面积与较高风险面积占比分别为60.25%和36.68%，石嘴山市和固原市的高温危险性相对较低，高风险面积与较高风险面积占比均在30%以下。由图8b可以看出，中卫市的高温风险性最高，高风险面积与较高风险面积占比高达74.58%，高于其他各市，其次是石嘴山市和吴忠市，高风险面积与较高风险面积占比分别为52.68%和33.66%，银川市和固原市的高温危险性相对较低，高风险面积与较高风险面积占比均在20%以下。由图8c可以看出，中卫市的高温风险性最高，高风险面积与较高风险面积占比高达92.16%，远高于其他各市，其次是石嘴山市和吴忠市，高风险面积与较高风险面积占比均在60%以上，银川市和固原市的高温危险性相对较低，高风

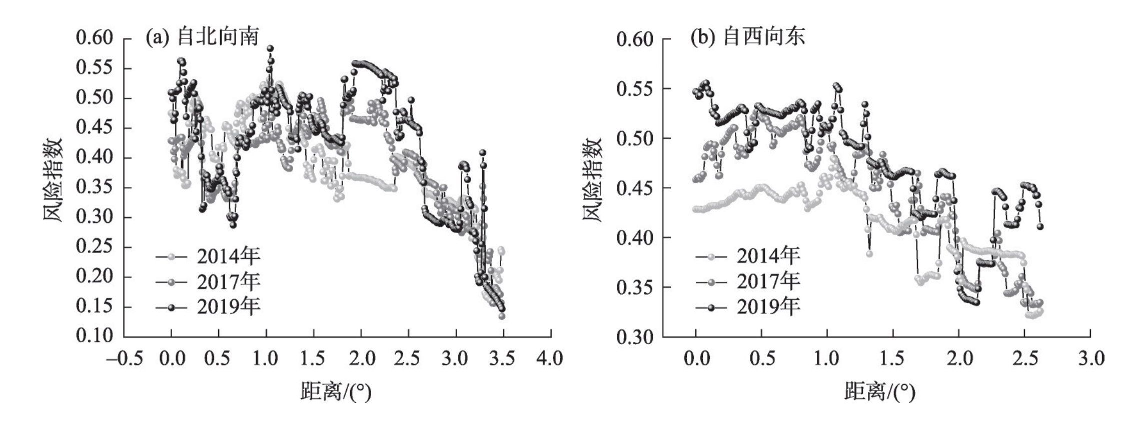


图7 不同方向高温风险指数变化曲线

Fig. 7 Variations of heat risk index in different directions

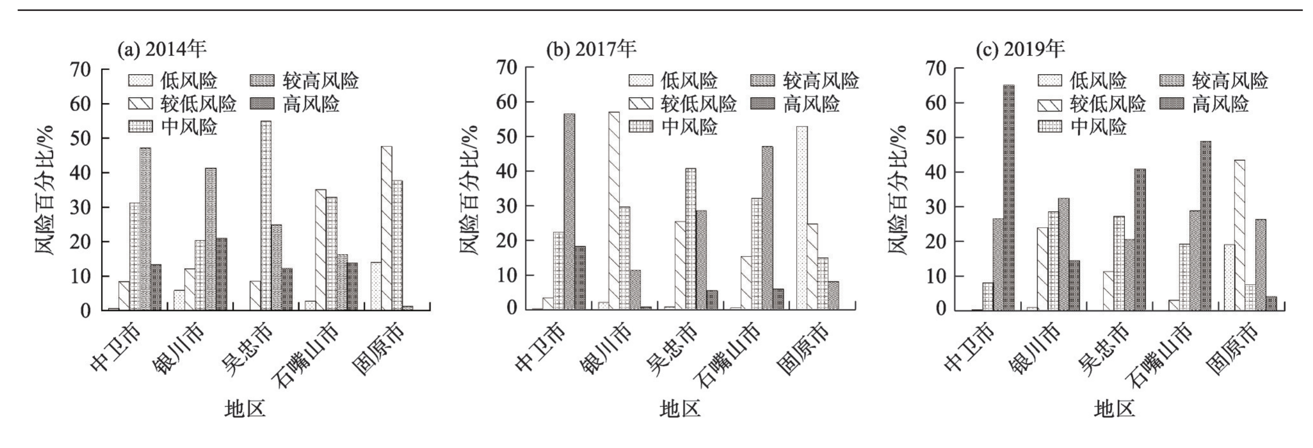


图8 宁夏各市高温风险等级面积比例

Fig. 8 Area proportions of different heat risk levels of each district in Ningxia

险面积与较高风险面积占比在50%以下。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文根据宁夏地区的气候特征及高温风险成因选取了13个指标来评估宁夏地区的高温热浪灾害风险。结果表明,宁夏地区高温热浪风险性逐年上升,这与中国区域性热浪时间规模的风险迅速上升[38],以及西北区域的高温日数和热浪次数是明显增加的[39]研究相符。此外,相关研究表明宁夏中部[40]、北部地区[21]是升温最快的区域,分别以0.42 ℃·$(10a)^{-1}$、0.36 ℃·$(10a)^{-1}$的速度增温[41],这与本文研究结果一致。

宁夏地区高温的形成受气候、地形、人为因素共同作用的影响。通过对比杨春白雪[42]、吴洪斌等[43]对宁夏地区生态以及高温的特征分析,由于选取高温风险成因指标略有不同,杨春白雪从人居环境状况角度出发,未考虑人口空间分布状态和社会经济因素,吴洪斌从风险度和敏感度方面分析了宁夏沙坡头地区的脆弱性空间分布,发现受全球气候变化的影响,生态系统的脆弱性进一步加剧,这与本文研究结果一致。通过对比与前人研究,由于人口空间分布状态和社会经济因素与宁夏地区的高温风险息息相关,本文在评估高温风险的指标中增加了这2个因素,进一步完善了评价结果,使得评价结果更符合实际。但高温热浪的发生还受土地利用、城市空气污染以及居民自身身体状况等多种因素的影响,这些都需要在今后的研究中进一步考虑。

4.2 结论

(1) 2014—2019年宁夏夏季高温风险范围有扩张趋势,其中较高和高风险地区面积占比从2014年39.52%增长至2019年62.65%。

(2) 风险性区划具有明显的空间差异。北部风险高于南部风险,差异性最大;西部风险高于东部风险,差异性较为显著;中部风险最高,区域差异性不显著。

(3) 宁夏地区各市县高温热浪风险空间分布差异较为显著。2014年较高和高风险面积占比呈现银川市(62.04%)>中卫市(60.25%)>吴忠市(36.68%)>石嘴山市(29.78%)>固原市(1.08%);2017年较高和高风险面积占比呈现中卫市(74.58%)>石嘴山市(52.68%)>吴忠市(33.66%)>银川市(11.65%)>固原市(7.86%);2019年较高和高风险面积占比呈现中卫市(92.16%)>石嘴山市(78.06%)>吴忠市(61.56%)>银川市(47.00%)>固原市(30.16%)。

参考文献(References)

[1] IPCC. Summary for policymakers[C]//Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 1-30.

[2] 冯雷, 李旭东. 高温热浪对人类健康影响的研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2016, 33(2): 182-188. [Feng Lei, Li Xudong. Effects of heat waves on human health: A review of recent study[J]. Journal of Environment and Health, 2016, 33(12): 182-188.]

[3] 张晓东, 赵银鑫, 武丹, 等. 基于遥感的银川市建成区城市扩展及其热环境变化分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(5): 1278-1288. [Zhang Xiaodong, Zhao Yinxin, Wu Dan, et al. Urban built-up area expansion and thermal environment variation in Yinchuan City based on remote sensing[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(5):

1278-1288.]

[4] Yang J, Ou C Q, Ding Y, et al. Daily temperature and mortality: A study of distributed lag non-linear effect and effect modification in Guangzhou[J]. Environmental Health, 2012, 11(1): 63, doi: 10.1186/1476-069X-11-63.

[5] López-Bueno J A, Navas-Martín M A, Linares C, et al. Analysis of the impact of heat waves on daily mortality in urban and rural areas in Madrid[J]. Environmental Research, 2021, 195(1): 110892, doi: 110810.111016/j.envres.112021.110892.

[6] Lansu E M, Heerwaarden C C, Stegehuis A I, et al. Atmospheric aridity and apparent soil moisture drought in european forest during heat waves[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(6): e2020GL087091, doi: 87010.81029/82020GL087091.

[7] Huo A, Peng J, Cheng Y, et al. Hydrological analysis of Loess Plateau highland control schemes in Dongzhi Plateau[J]. Frontiers in Earth Science, 2020, 8: 528632, doi: 528610.523389/feart.522020.528632.

[8] Lee Y Y, Grotjahn R. California central valley summer heat waves form two ways[J]. Journal of Climate, 2016, 29(3): 15120815235 1006, doi: 10.1175/JCLI-D-15-0270.1.

[9] Hochman A, Scher S, Quinting J, et al. A new view of heat wave dynamics and predictability over the eastern Mediterranean[J]. Earth System Dynamics, 2021, 12(1): 133-149.

[10] Kunkel K E, Lian X Z, Zhu J H. Regional climate model projections and uncertainties of U.S. summer heat waves[J]. Journal of Climate, 2010, 23(16): 4447-4458.

[11] Yin C, Yang F, Wang J L, et al. Spatiotemporal distribution and risk assessment of heat waves based on apparent temperature in the One Belt and One Road Region[J]. Remote Sensing, 2020, 12(7): 1174, doi: 10.3390/rs12071174.

[12] Semenza J C, Rubin C H, Falter K H, et al. Heat-related deaths during the july 1995 heat wave in Chicago[J]. The New England Journal of Medicine, 1996, 335(2): 84-90.

[13] Mandal R, Joseph S, Sahai A K, et al. Real time extended range prediction of heat waves over India[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 9008, doi: 10.1038/s41598-019-45430-6.

[14] Phung D, Chu C, Tran D N, et al. Spatial variation of heat-related morbidity: A hierarchical Bayesian analysis in multiple districts of the Mekong Delta Region[J]. Science of the Total Environment, 2018, 637: 1559-1565.

[15] Kuglitsch F G, Toreti A, Xoplaki E, et al. Heat wave changes in the eastern Mediterranean since 1960[J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(4): 379-384.

[16] Inostroza L, Palme M, De la Barrera F. A heat vulnerability index: Spatial patterns of exposure, sensitivity and adaptive capacity for Santiago de Chile[J]. PloS one, 2016, 11(9): e0162464, doi: 016241 0.0161371/journal.pone.0162464.

[17] Gertrud, Hatvani-Kovacs, Martin, et al. Assessment of heatwave impacts[J]. Procedia Engineering, 2016, 169: 316-323.

[18] 张晓艳, 刘梅先. 洞庭湖流域高温热浪风险变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(10): 1729-1735. [Zhang Xiaoyan, Liu Meixian. Trends and risks of extreme heat events in the Dongting Lake catchment[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(10): 1729-1735.]

[19] 焦文慧, 张勃, 马彬, 等. 近58 a中国北方地区极端气温时空变化及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(5): 1220-1230. [Jiao Wenhui, Zhang Bo, Ma Bin, et al. Temporal and spatial changes of extreme temperature and its influencing factors in northern China in recent 58 years[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(5): 1220-1230.]

[20] 杨建玲, 冯建民, 闫军, 等. 宁夏高温气候特征及其大气环流异常分析[J]. 中国沙漠, 2012, 32(5): 1417-1425. [Yang Jianling, Feng Jianmin, Yan Jun, et al. Analysis of high temperature climatic characteristics in Ningxia and atmospheric circulation anomaly[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(5): 1417-1425.]

[21] 孙艺杰, 刘宪锋, 任志远, 等. 1960—2016年黄土高原干旱和热浪时空变化特征[J]. 地理科学进展, 2020, 39(4): 591-601. [Sun Yijie, Liu Xianfeng, Ren Zhiyuan, et al. Spatiotemporal changes of droughts and heatwaves on the Loess Plateau during 1960—2016[J]. Progress in Geography, 2020, 39(4): 591-601.]

[22] 刘学智, 李王成, 苏振娟, 等. 1962—2015年宁夏平均气温和极端气温的变化特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(5): 1173-1180. [Liu Xuezhi, Li Wangcheng, Su Zhenjuan, et al. Change of mean temperature and extreme temperature in Ningxia during the period of 1962—2015[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(5): 1173-1180.]

[23] 杨宝玲, 杨婧, 陈彦虎, 等. 西北地区夏季极端高温异常特征及其成因[J]. 农业科学研究, 2014, 35(1): 20-28. [Yang Baoling, Yang Jing, Chen Yanhu, et al. The characteristics and causes of extremely high temperature events in summer in northwest China[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2014, 35(1): 20-28.]

[24] 李志军. 宁夏气候变化及其对植被覆盖的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2010. [Li Zhijun. Ningxia climate change and its effects on vegetation cover[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010.]

[25] Huo A D, Yang L, Luo P P, et al. Influence of landfill and land use scenario on runoff, evapotranspiration, and sediment yield over the Chinese Loess Plateau[J]. Ecological Indicators, 2021, 121: 107208, doi: 107210.101016/j.ecolind.102020.107208.

[26] 孙灏, 马立茹, 蔡创创, 等. 干旱区地表温度和热岛效应演变研究——以宁夏沿黄城市带为例[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 694-705. [Sun Hao, Ma Liru, Cai Chuangchuang, et al. Evolution of surface temperature and heat island effect in arid areas: A case of city belt along the Yellow River in Ningxia[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(3): 694-705.]

[27] 张明军, 汪宝龙, 魏军林, 等. 近50年宁夏极端气温事件的变化研究[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(4): 152-160. [Zhang Mingjun, Wang Baolong, Wei Junlin, et al. Extreme event changes of air temperature in Ningxia in recent 50 years[J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(4): 152-160.]

[28] 付含聪, 邓帆, 杨欢, 等. 基于遥感的长江中下游城市群高温热浪风险评估[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(5): 1174-1182.

[Fu Hancong, Deng Fan, Yang Huan, et al. Assessing heat wave risk of urban agglomeration in the middle-lower Yangtze River based on remote sensing[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(5): 1174−1182.]

[29] 边增淦, 王文, 江渊. 黑河流域中游地区作物种植结构的遥感提取[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(10): 1629−1641. [Bian Zenggan, Wang Wen, Jiang Yuan. Remote sensing of cropping structure in the middle reaches of the Heihe River Basin[J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(10): 1629−1641.]

[30] 金星星, 祁新华, 陆玉麒, 等. 福建省高温热浪风险评估与空间分异研究[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(12): 1820−1829. [Jin Xingxing, Qi Xinhua, Lu Yuqi, et al. Evaluation and spatial differentiation of heat waves risk of Fujian Province[J]. Journal of Geo-information Science, 2018, 20(12): 1820−1829.]

[31] 武夕琳, 刘庆生, 刘高焕, 等. 高温热浪风险评估研究综述[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(7): 1029−1039. [Wu Xilin, Liu Qingsheng, Liu Gaohuan, et al. Risk assessment of heat waves: A review [J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(7): 1029−1039.]

[32] 刘勇洪, 权维俊. 北京城市高温遥感指标初探与时空格局分析[J]. 气候与环境研究, 2014, 19(3): 332−342. [Liu Yonghong, Quan Weijun. Research on high temperature indices of Beijing City and its spatiotemporal pattern based on satellite data[J]. Climatic and Environmental Research, 2014, 19(3): 332−342.]

[33] Lu D S, Tian H Q, Zhou G M, et al. Regional mapping of human settlements in southeastern China with multisensor remotely sensed data[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(9): 3668−3679.

[34] 陈倩, 丁明军, 杨续超, 等. 长江三角洲地区高温热浪人群健康风险评价[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(11): 1475−1484. [Chen Qian, Ding Mingjun, Yang Xuchao, et al. Spatially explicit assessment of heat health risks using multi-source data: A case study of the Yangtze River Delta Region, China[J]. Journal of Geo-information Science, 2017, 19(11): 1475−1484.]

[35] 王彦芳, 边继云, 李国庆. 未来情景下高温对雄安新区产业劳动生产率的影响及应对策略[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(6): 73−83. [Wang Yanfang, Bian Jiyun, Li Guoqing. The impact of hot weather on regional labor productivity over Xiong'an New District under future climate scenario[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(6): 73−83.]

[36] 王梅梅, 朱志玲, 吴咏梅. 宁夏中部干旱带土地沙漠化评价[J]. 中国沙漠, 2013, 33(2): 320−324. [Wang Meimei, Zhu Zhiling, Wu Yongmei. Assessment on the sensitivity to aeolian desertification and lmportance of controlling aeolian desertification in the middle arid region of Ningxia[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(2): 320−324.]

[37] 陈林, 杨新国, 宋乃平, 等. 宁夏中部干旱带主要植物叶性状变异特征研究[J]. 草业学报, 2014, 23(1): 41−49. [Chen Lin, Yang Xin'guo, Song Naiping, et al. A study on variations in leaf trait of 35 plants in the arid region of middle Ningxia, China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(1): 41−49.]

[38] Wang J, Yan Z. Rapid rises in the magnitude and risk of extreme regional heat wave events in China[J]. Weather and Climate Extremes, 2021, 34(4): 100379, doi: 100310.101016/j.wace.102021.100379.

[39] 张嘉仪, 钱诚. 1960—2018年中国高温热浪的线性趋势分析方法与变化趋势[J]. 气候与环境研究, 2020, 25(3): 225−239. [Zhang Jiayi, Qian Cheng. Linear trends in occurrence of high temperature and heat waves in China for the 1960—2018 period: Method and analysis results[J]. Climatic and Environmental Research, 2020, 25(3): 225−239.]

[40] 冯克鹏, 田军仓, 沈晖. 基于K-means聚类分区的西北地区近半个世纪气温变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1239−1252. [Feng Kepeng, Tian Juncang, Shen Hui. Temperature variation characteristics of northwest China based on K-means clustering partition in the past half century[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(6): 1239−1252.]

[41] 刘学智, 李王成, 苏振娟, 等. 1962—2015年宁夏平均气温和极端气温的变化特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(5): 1173−1180. [Liu Xuezhi, Li Wangcheng, Su Zhenjuan, et al. Change of mean temperature and extreme temperature in Ningxia during the period of 1962—2015[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(5): 1173−1180.]

[42] 杨春白雪, 李建华, 李佳康, 等. 宁夏生态移民新村人居环境适宜性评价[J]. 农业科学研究, 2020, 41(2): 23−29. [Yang Chunbaixue, Li Jianhua, Li Jiakang, et al. The nature suitability evaluation of human settlement environment in Ningxia ecomigration villages[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2020, 41(2): 23−29.]

[43] 吴洪斌, 刘荣国, 王原, 等. 宁夏沙坡头自然保护区气候变化脆弱性评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(增刊2): 30−34. [Wu Hongbin, Liu Rongguo, Wang Yuan, et al. Climate change vulnerability assessment of Shapotou Nature Reserve in Ningxia [J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(Suppl. 2): 30−34.]

Assessing heat wave risk in Ningxia segment based on remote sensing

ZHAO Zhixin[1,2], HUO Aidi[1,2], ZHANG Dan[3], YI Xiu[1,2], CHEN Siming[1,2], CHEN Sibin[1,2], CHEN Jian[1, 2]

(1. School of Water and Environmental, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in the Arid Region Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: The disaster risk information of the heat wave is of great reference value for preventing and controlling extreme disaster events under global warming and rapid urbanization. Since the spatial distribution of population and social and economic factors are closely related to regional high temperature risk, this paper combines these two factors to the evaluation index of heat waves risk to improve the evaluation result and make the evaluation result more consistent with reality. Additionally, meteorological data were added based on the multi-source satellite remote sensing and socio-economic statistics data to solve the problem of incomplete risk assessment of heat wave. Hazard factors were obtained by combining surface temperature and meteorological data. In Matlab software, the corresponding target, criterion, and index layers are divided according to the components of heat wave risk. Pairwise comparison is conducted on the indexes. Then, a judgment matrix is constructed according to their relative importance, and a consistency test is performed. Consequently, the weight of each index is obtained. Then, the spatial overlay tool in ArcGIS 10.3 software was used to superimpose normalized indicators according to their respective weights to obtain the spatial distribution map of heat wave risk in Ningxia Province, northwest China from July to August between 2014 and 2019. The results are as follows. The overall risk of heat wave in Ningxia is at an upper-medium level, with the proportion of high and higher risk areas increasing from 39.52% in 2014 to 62.65% in 2019. There is a significant spatial difference in heat wave risk affected by geographical latitude, topography, and climate. The northern area showed higher heat risk than the southern area (about 13.27% higher), and the western area showed a slightly higher risk than the eastern area (about 12.30% higher). High-risk areas are concentrated in Zhongwei City and Shizuishan City because of the city's high temperature and relatively low medical level. This study is essential for preventing urban disasters and formulating an emergency plan to deal with heat wave.

Key words: heat wave; human settlement index; risk assessment; remote sensing; Ningxia